

平成21年6月30日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007 ～ 2008  
 課題番号：19740299  
 研究課題名（和文） ヤマセ雲を例とした数値予測モデルにおける下層雲のパラメタリゼーションの開発  
 研究課題名（英文） Development of a parameterization scheme for low-level clouds for use in numerical prediction models: a case in Yamase event  
 研究代表者  
 野田 暁 (NODA AKIRA)  
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・特任研究員  
 研究者番号：80396431

研究成果の概要：大気境界層乱流に伴って発生する下層雲のパラメタリゼーションの開発を行った。これまでの気象予測モデルで用いられていたパラメタリゼーションでは水蒸気が地表面付近に滞留する傾向があり、これが境界層を過剰に湿らせることで過大な雲生成へとつながっていた。鉛直乱流拡散をもたらすパラメタリゼーションを導入することにより、水蒸気が鉛直により輸送されることで境界層内の過湿を押さえ、雲の過大生成を抑制した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,200,000	180,000	2,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：下層雲, 大気境界層, 乱流, パラメタリゼーション

## 1. 研究開始当初の背景

下層雲の予報を困難にしている原因の1つに空間スケールの小ささがある。特に、ヤマセ雲に伴う大気境界層の厚さは数100m程度と薄く、少なくとも、この程度の空間スケールを持った乱渦がヤマセ雲の空間構造に対して大きく影響していると考えられる。一方、一般に数値予報モデルは水平解像度が10km程度で用いられるため下層雲を陽に計算することはできず、パラメタライズする必要がある。

## 2. 研究の目的

ヤマセ雲を初めとする雲量の大きな層雲のパラメタリゼーションを提案することである。このような層雲は比較的安定な大気中において発生する一方、一旦発生すると大きな雲

放射冷却効果によって大気を不安定化させ、自発的に発達するなど、これまで良く調べられてきた層積雲、あるいは積雲とは異なる特徴を備えている。雲の生成と雲による放射、大気境界層内外の乱流の振舞いの統一的な知見が得られるとともに、これまでメソ数値予報モデルで解像できなかった下層雲のパラメタリゼーションを提案することでヤマセ雲の発生発達の予測精度を図る。

## 3. 研究の方法

低解像度モデルで用いるための下層雲のパラメタリゼーション開発の基礎となる下層雲、及び、その大気場の3次元データを得るために、雲と大気乱流を共に解像する高解像度数値実験を行う。高解像度実験の予備実験結果より、主な対象とする2003年6月23日のヤマセに伴

う大気境界層の乱流を解像するためには少なくとも鉛直5m、水平10m程度の解像度が必要であり、計算境界の人為的影響を除くためには水平6km、鉛直2km程度の計算領域を必要とする。乱流統計量の解析のもととなるヤマセ雲の高解像度数値実験を実施する。

下層雲のパラメタリゼーションには、サブグリッドスケールで起こる1)大気乱流や対流に伴う水蒸気、熱、運動量の鉛直渦輸送と2)凝結による雲水の生成過程、3)雲量をパラメタリゼーションする必要がある。渦輸送については現在でも乱流境界層スキームの改善が活発に成されているが、ヤマセの発生時の様な安定度の高い成層では力学的な乱流生成過程が重要であり、従来の研究では十分検証されているとは言えない。そこで、まず過去の研究例を基に乱流境界層スキームを導入し、高解像度モデルの結果を基に適正なパラメタリの検証を行う。凝結過程と雲量については確率密度関数によりサブグリッドスケールの非均一性を表しヤマセ雲のパラメタリゼーションを行う。

#### 4. 研究成果

##### ①下層雲のパラメタリゼーションと検証

##### パラメタリゼーション

##### 乱流拡散係数

乱流エネルギー(TKE)を予報し、これを基に乱流拡散係数を診断する。まず、運動量拡散係数を次の様にパラメタリゼーションする:

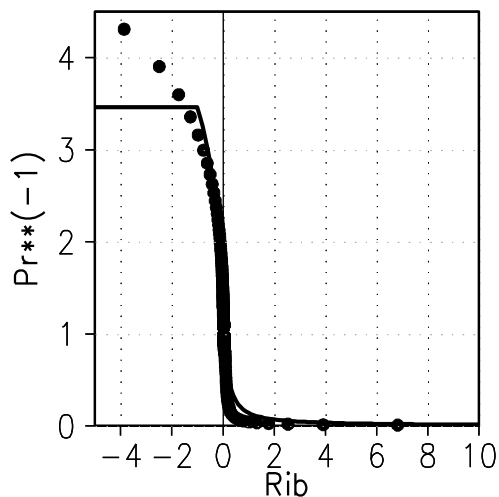


図 1: 近藤(1994)による無次元勾配を用いて、相似則を基に数値的に解いた乱流プラントル数とバルクリチャードソン数の関係(点)と、その近似曲線(実線)。

$$K_m = F(z/z_0, R_{ib})L(TKE)^{0.5},$$

ここで、 $L$  は乱流長さスケールである。 $F(z/z_0, R_{ib})$  は安定度と粗度の関数であり、Louis (1979)に倣い接地層の野外観測データから得られている経験式で与える。

##### 乱流長さスケール

これまでに多くの診断式が提案されているものの、その多くは雲との相互作用を十分考慮していなかった。雲を伴う大気場においては雲の凝結に伴い成層は安定化される。このため雲層と混合層との間でしばしば乱流デカップリングが起こり、乱流輸送が制限される。また、雲に伴う強い放射冷却は乱流を生成しこれが自由大気との間で起こる乱流混合を促進する。従って、雲を伴うより一般的な環境場での長さスケールは周辺の成層とのバランスを基にして決めるのが望ましい。そこで、上向き/下向き平均自由行程( $L_{up}/L_{dn}$ )を用いて次の様にパラメタリゼーションする:

$$1/L = 1/(\kappa z) + 1/\sqrt{L_{up}L_{dn}},$$

ここで、 $L_{dn}$ 、 $L_{dn}$  はそれぞれ

$$\int_z^{z+L_{up}} \frac{g}{\theta_0} (\overline{\theta_v}(z') - \overline{\theta_v}(z)) dz' = TKE(z),$$

$$\int_{z-L_{dn}}^z \frac{g}{\theta_0} (\overline{\theta_v}(z) - \overline{\theta_v}(z')) dz' = TKE(z),$$

を満たす長さである。オーバーバーはアンサンプル平均量であり格子点の値を用いる。この様に局所的な TKE の変動を長さスケールに反映させることで、従来は考慮することが難しかった局所的な風の鉛直シアに伴う乱流混合等もより詳細に扱うことができる。

## 乱流プラントル数 ( $P_r$ )

強安定や強不安定な環境下における乱流の統計的振舞いのモデル化は決して特殊な問題ではない。例えば、境界層の上には常に自由大気という強い安定成層が存在しており、その間の乱流混合が雲の生成量に大きく影響している。従って信頼できるモデル化のためには、観測事実を基にした、より幅広い安定度の下で得られている経験式を応用することが望まれる。近藤 (1994)は冬季の野外観測を基にバルクリチャードソン数( $R_i$ )  $\leq 10$ で使用できる接地層の無次元勾配関数を提案している。彼らの結果を基に得られた数値解を図1に示す。

図より、特に興味深いのは安定時の乱流の振舞いである。従来のモデルでは安定度が増すにつれて乱流は減衰し  $R_i \sim 0.2$  を超えると混合はほとんど起こらないとしていた。しかし、観測事実によれば乱流混合は必ずしも完全に消滅するのではなく、 $R_i \sim 2$  程度まではほぼ恒常的に起こる非定常的乱流によってわずかながら維持されていることを示唆している。 $R_i < 1$  では今後の観測的研究結果に期待し、本研究では便宜上、一定値を用いる。

## 雲と降水

雲水量と雲量の診断は Mellor (1977)による部分凝結スキームを用いる。このスキームの主な利点は雲生成と雲放射過程との相互作用を整合的に扱うことができることである。

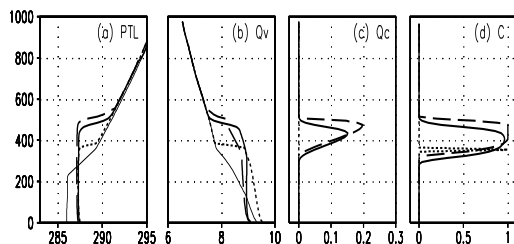


図 2: ヤマセ雲発生時のアンサンブル平均量の鉛直構造。3時間後の(a)液水温度(K)、(b)水蒸気混合比( $\text{g kg}^{-1}$ )、(c)雲水混合比( $\text{g kg}^{-1}$ )、(d)雲量。LES とパラメタリゼーションを用いない場合、用いた場合のSCMの結果をそれぞれ実線、点線、破線で、そして初期場を細い実線で示す。LESは水平面平均値を示す。

サブグリッドスケールの温度と水の2次乱流統計量は野田ほか(2005,気象学会秋)による診断式で与える。雲水から雨水への変換過程は

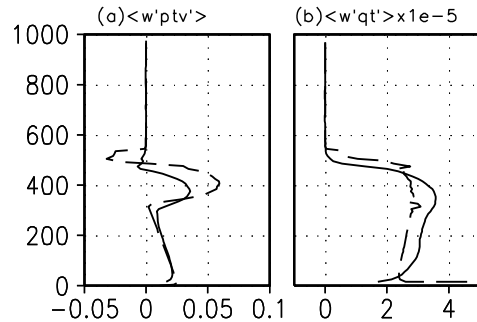


図 3: ヤマセ雲発生時の乱流の鉛直構造。3時間後の(a)温度フラックス( $\text{K m s}^{-1}$ )と(b)水蒸気フラックス ( $10^5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )。LES とパラメタリゼーションを用いた SCM をそれぞれ実線と破線で示す。

Kessler 型オートコンバージョンを用いる。

## 結果

### LES vs. 1次元モデル (SCM)

まず、理想化した環境場におけるパラメタリゼーションの妥当性を調べるために LES を行い、これと比較する。成層はヤマセ発生時の1次元サウンディングを用いた。SCMはLESによる熱や水蒸気分布の鉛直構造だけでなく、それに伴って発達する雲をよく再現している(図2)。パラメタライズされた乱流統計量の鉛直分布も LES と概ね一致している(図3)。例えば、LESによる温度フラックスは地表面と境界層上部で極値を持っており層積雲を伴う典型的な境界層構造を示している。定量的にはまだ改善の余地がありそうであるが、SCMも同様の構造を再現している。

### 領域モデルを用いた感度

MRI-NHM を用いて水平格子間隔 10km によるヤマセ雲発生時の現実場実験を行った(図4)。観測的研究から、ヤマセ雲の鉛直積算雲水量は  $110 \text{ g m}^{-2}$  程度であることが報告されているが(Kojima et al., 2006)、海洋上で見られる  $200 \text{ g m}^{-2}$  を越える様な雲水量の過剰生成がパラメタリゼーションを用いることで緩和されている(図4上段)。また、陸域では、山岳に沿った雲の生成が起きている(図4下段)。TKEの鉛直分布を見ると(図5)、特に海洋上と山岳風下側でTKEが発達することがわかる。TKE方程式の収支解析より(図6)、海洋上では浮力生成項、山岳付近では風の鉛直変化に伴うシア生成項が主にTKEの発達に寄与していることがわかる。

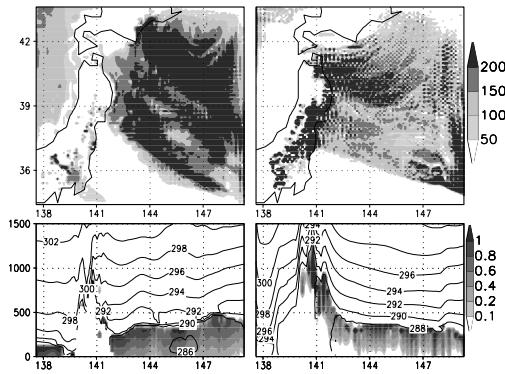


図4: 2003年6月22日ヤマセの現実場を用いたときのパラメタリゼーションの感度。パラメタリゼーションを(左段)用いない場合と(右段)用いた場合について、(上段)高度2km以下で積算した雲水量( $\text{g m}^{-2}$ )、(下段)緯度39度に沿った温位(K)と雲水混合比( $\text{g kg}^{-1}$ )の鉛直断面を計算開始から9時間後について示す。

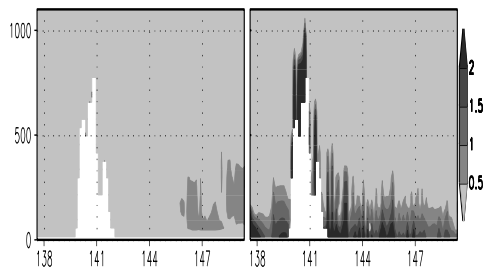


図5: 緯度39度に沿ったサブグリッドスケールの乱流エネルギー( $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ )の鉛直断面。パラメタリゼーションを(左)用いない場合と(右)用いた場合。

## まとめ

雲を伴う境界層乱流のより現実的なモデル化を行うために、乱流長さスケールや Pr の精緻化等を試みた。簡略化した環境場の下、SCM で妥当性を確認した後、領域モデルへ導入し、その影響を調べた。従来は、サブグリッドスケールの TKE の発達が適切に起こらずこのことが乱流による鉛直輸送を妨げていた。パラメタリゼーションにより、TKE が発達することで乱流混合が起こり熱や水蒸気を鉛直に輸送する。この結果、海洋上では境界層下部の過湿を緩和させ、また陸上では境界層上部の湿度を上昇させることで雲の生成に寄与している。本研究では、9 時間程度の時間積分による感度を示すに留まった

が、今後は衛星観測による雲水量の広域分布との比較を進め、その長期的な再現性の向上と改良を試みる。

## 参考文献

- Kojima, M., S. Asano, and H. Iwabuchi, 2006: Time-variations of optical and microphysical properties of Yamase clouds estimated from shipboard experiments and satellite remote sensing in June 2003, SOLA, 2, 45-48.
- 近藤純正, 1994: 水環境の気象学, 朝倉書店, 350pp.
- Mellor, G. L., 1977: The Gaussian cloud model relations. J. Atmos. Sci., 34, 355-358.
- 野田暁, 岩崎俊樹, 氏家将史, 2005: 下層雲のパラメタリゼーションスキームの開発。～サブグリッドスケールの湿度分散の改良～, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 日本気象学会, 88.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, S. Iga, and Y. Tsushima, 2009: Importance of the subgrid-scale turbulent moist process: Cloud distribution in global cloud-resolving simulations. Atmos. Res. (in press) (査読有)
- ② Ishii, S., K. Sasaki, K. Mizutani, H. Kanno, D. Matsushima, W. Sha, A. T. Noda, M. Sawada, M. Ujiie, Y. Matsuura, and T. Iwasaki, 2008: Temporal evolution and spatial structure of the local easterly wind "Kiyokawa-dashi" in Japan PART I: Coherent doppler lidar observation. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 797-813. (査読有)
- ③ 野田暁, 中村晃三, 2008: 大気境界層雲の LES, 気象研究ノート, 219, 日本気象学会, 89-116. (査読無)
- ④ 野田暁, 新野宏, 2007: 竜巻を伴う積乱雲の高解像度数値シミュレーション - 竜巻の発生メカニズムの解明に向けて -. 日本風工学会誌, 32, 357-368. (査読無)

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① Noda, A. T.: Development of a Global Cloud-Resolving model NICAM: Boundary-layer process and low-level cloud. 4th PAN-GCSS meeting on clouds, climate and models, Toulouse, France, 5 June, 2008.
- ② 野田暁: 全球非静力学モデル NICAM における下層雲の振舞い -2004 年 6 月～8 月のケース～、日本気象学会秋季大会講演予稿集、日本気象学会、2008 年 5 月 19 日、神奈川、横浜市開港記念館。
- ③ Noda, A. T.: A preliminary study on boundary-layer clouds in a global 14km-mesh experiment by NICAM. Workshop on Short-range numerical weather prediction, 6 November 2007, Deutscher Wetterdienst, Bad Orb, Germany.
- ④ 野田暁: 全球非静力学モデル NICAM における境界層雲の検証と改良。日本気象学会秋季大会、日本気象学会、2007 年 10 月 16 日、北海道、北海道大学。
- ⑤ Noda, A. T.: A parameterization for the cloud-topped boundary-layer, and its validation using a regional model. The 7th European Meteorological Society annual meeting, 2 October 2007, El Escorial, Spain, European Meteorological Society.
- ⑥ 野田暁: 全球非静力学モデル NICAM の境界層過程の改善、第 9 回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集、2007 年 9 月 13 日、京都府、京都大学。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野田 暁 (NODA AKIRA)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境

フロンティア研究センター・特任研究員

研究者番号：80396431

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし